

論 文

かご型イオン風速計の基礎特性

浅野和俊*, 東山禎夫*, 奥山英樹*

(1988年5月10日受理)

Fundamental Characteristics of Cage Type Ion-flow Anemometer

K. ASANO,* Y. HIGASHIYAMA* and H. OKUYAMA*

(Received May 10, 1988)

An ion-flow anemometer with multi-collector was constructed in the basis of the results of previous paper and the effects of the number of collector on performance was investigated. The measuring probe of the anemometer consists of a fine discharging wire and several ion collectors surrounding it. The probe can be rearranged by changing the number of collectors from 2 to 8. Collector electrodes were divided into the windward and leeward side and their differential ion current was electronically processed to obtain the anemometer output. The results showed that the configuration of the measuring probe affects significantly the corona discharge conditions. The 8-collector system has the lowest corona onset voltage and keeps the most stable discharge among five tested configurations in static condition. The anemometer output with each probe was obtained for wind velocity under 10 m/s in the wind-tunnel test. Generally the relation between output signal and wind velocity shows good linearity. However, in the region of very low wind velocity under 1.5 m/s, the relation dose not show this linearity due to corona wind. This effect can be reduced by increasing the number of collectors. The 8-collector system has the preferable property and its measuring precision was 2% at 9 m/s.

1. まえがき

イオンが生成されている空間に気流が存在すると、イオンが風で運ばれることにより、イオン発生源の近傍に配置されたイオン収集電極あるいはコレクタに流入するイオンの量が変化する。単純な電極構造はイオン発生源と風下に配置されたコレクタから成り、そのコレクタのイオン電流の変化から気流の速度を求めることができる。イオン発生源として種々のものがあるが、いずれも生成イオン量の変動が直接出力に影響を与えるため、通常は風上と風下にコレクタを有する差動型にしてイオン風速計を構成する¹⁾。一定の強さの電離放射線により生成されたイオンを利用する風速計については多くの詳細な検討が行なわれているが²⁻⁵⁾、イオン電流の大きさが小さく、適用が限定される。一方、コロナ放電を利用する場合にはイオン電流を大きくできる利点があるが、風速計に対する適用性については電極構成、測定精度などその基礎特性が明らかになっていないので、議論する段

階に達していない。ただ、電極間をイオンが移動する時間と風速との関係に着目した方式に対してだけ詳細な検討が行なわれているにすぎない^{6,7)}。

差動型イオン風速計はイオン量の変化をとらえるものであり、生成イオンの変動が出力に大きな影響を与えるような工夫が必要である。前報では差動型イオン風速計において風速プローブのコレクタ電流の変動を補償する方法を提案し⁸⁾、試作した風速プローブを用いてその有用性を示した。

気中イオンを利用した風速計はコレクタに到達するイオンの量を電流値で検知するため、電流測定系の時定数を変えることにより応答速度を任意の値に設定することができる。通常の回転式の風速計に比べ応答速度を数桁速くすることも容易である。パルス性のコロナ放電でなければ、生成されるイオンの量は時間的には一定とみなせるので数 ms の応答時間が達成できる。一方、放射性同位元素からの α 線により生成したイオンを利用する場合のように、短い時間の範囲で生成イオンの量が時間により変動するときには、測定精度を上げる目的で時定数を長く設定することもできる。

本研究は応答速度の高い差動型イオン風速計の性能向上と実用化に対する問題点を明らかにするために、前報

* 山形大学工学部電気工学科 (992 米沢市城南 4-3-16)
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yamagata University, 3-16, Jonan 4-chome, Yonezawa, 992 Japan

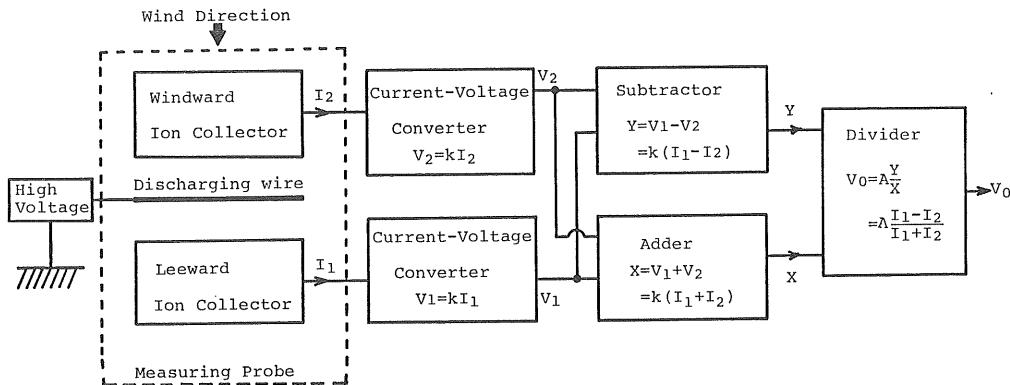


図1 差動型イオン風速計の構成図

Fig. 1 Schematic diagram of a differential ion-flow anemometer.

で用いた2コレクタ型の風速プローブを改良し、実験的検討を行なった。とくに、二次元方向の風速を風向と一緒に測定することは、実際の測定現場では重要であり、方向感度特性を明らかにして方向検知機能をもたせるための基礎データを得ることを主眼に置いた。風速プローブは細線のコロナ放電電極の周りに8本までのコレクタ電極を配置できるようにし、コレクタ電極の数を変えた場合のコロナ放電特性、風速計としての測定精度、性能に及ぼす電極数の影響を明らかにした。

2. 実験装置および方法

2.1 差動型イオン風速計の構成

コレクタに流れる電流と風速との関係を求めるための回路構成の概略図を信号の流れとともに図1に示す。放電線を中心にして風上側と風下側のコレクタが対称している。風下側および風上側のコレクタに流れ込む電流の大きさをそれぞれ I_1 および I_2 とする。イオン電流の大きさは電流-電圧変換回路で電圧信号に変換された後、それぞれ減算器および加算器に入力され $I_1 - I_2$ および $I_1 + I_2$ に比例した信号を得る。その後これらを割算器に入力して、 $(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ の演算を行ない差動型イオン風速計としての出力を得る。ここで、 $I_1 - I_2$ は風により流されたイオンの量の変化を示し、一方、 $I_1 + I_2$ はその風速でコレクタに捕捉された全イオン量を示している。全イオン量でイオンの変化量を規準化しているのは、コロナ放電の変動により、生成するイオンの量の変動を緩和させるためである。

イオン電流の測定感度は電流-電圧変換回路における演算增幅器の帰還抵抗の値により設定することができる。一方、帰還抵抗と帰還キャパシタとの積で電流測定の時定数が求められるので、この値から風速計としての

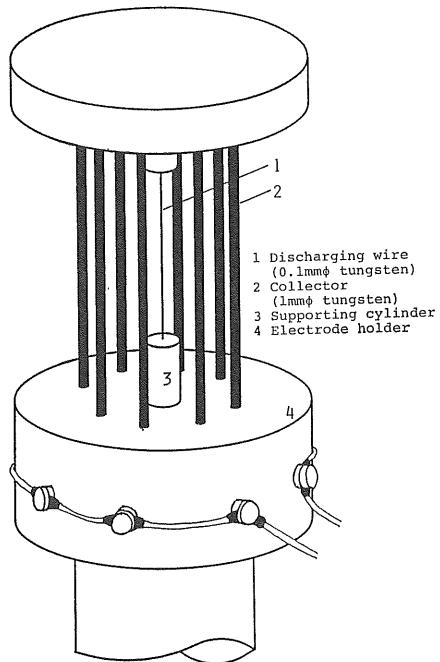


図2 8本のコレクタを設置した風速計プローブ

Fig. 2 Measuring probe of an ion-flow anemometer with 8 collectors.

応答速度が決まる。ここでは、帰還抵抗として $100\text{ k}\Omega$ 、帰還キャパシタとして $0.047\text{ }\mu\text{F}$ を用いたので、時定数は 4.7 ms である。

2.2 風速プローブ

風速プローブの外観図を図2に示す。プローブはコロナ放電を起こすための放電線、生成したイオンを集めるコレクタ、およびそれらの支持体とから構成されている。図に示すようにプローブには、最大8本までのコレ

クタを設置することができ、使用するコレクタの数、配置および風上側あるいは風下側となるコレクタの組合せを変えることができる。

コレクタは太さ $1\text{ mm}\phi$ のタンガステン棒であり、放電線を中心に半径 12 mm の円周上に位置する。コレクタは実質的に接地されており、正極性の高電圧が放電線に印加されている。放電線表面の電界の強さをコロナ放電を起こすのに十分な値にして、コロナ放電が放電線の周囲だけで起こるようしている。コレクタはプローブの構成材としての役割も果たしている。

プローブの中心には直径 $0.1\text{ mm}\phi$ のタンガステン放電線が長さ 10 mm のデルリン製の放電線支持体を通して張られている。放電線の有効長さは 30 mm である。また、放電線の振動はコロナ電流の大きさに影響を与えるので、振動を極力防ぐために放電線には支持体内部でばねを用いて張力をもたせている。

図3(a)～(e)に示すように最大8本のコレクタを風上側および風下側の2群に分けて、コレクタの数とその配置を変えることにより5種類のプローブ形状を構成した。ここではそれぞれのプローブ形状を2, 4A, 4B, 6, および8電極配置と呼ぶ。本研究ではおもに8電極配置についてその特性を詳細に調べ、目的に応じて各電極配置の特性と比較した。

直流コロナ放電により生成されるイオンを利用する場合、イオン発生量の変動が風速測定システム全体の応答に大きな影響を与えるので、安定度の高い高電圧電源が要求される。電源の安定性を保証するため、直流 12 V 入力型の高圧電源（東和計測（株）、KT-5010）を採用し、1次入力として 6 V の実験用蓄電池（湯浅電池（株）NS 60）を2個直列にして用いた。この結果、安定した高圧電源を実現することができた。なお、印加電圧が低く比較的小さなコロナ電流領域では、正極性のコロナ放電はパルス性ではなく、負極性のコロナ放電に比べて安定していることが実験的にも確かめられたので、放電線へは正極性の電圧を印加した。

2.3 実験風洞

イオン風速計の風速変化に対する応答特性を求めるために吸い出し形の風洞を用いた。測定部の大きさは断面が $180 \times 180\text{ mm}$ 、長さ 800 mm である。測定部において層流が得られるように上流部にハニカム型整流板を用いた。開口比は $1:3.8$ で、測定部ではほぼ一様な流れが得られている。風速の調節は吸い出し用ファン（松下電器（株）、FU-30 GSF-A）に供給する電圧を変えて行ない、最大 9.5 m/s までの風速が実現できる。イオン風速計は放電線が風洞の中央の高さにくるように設置した。

風速測定の標準として熱線式風速計（KANOMAX-

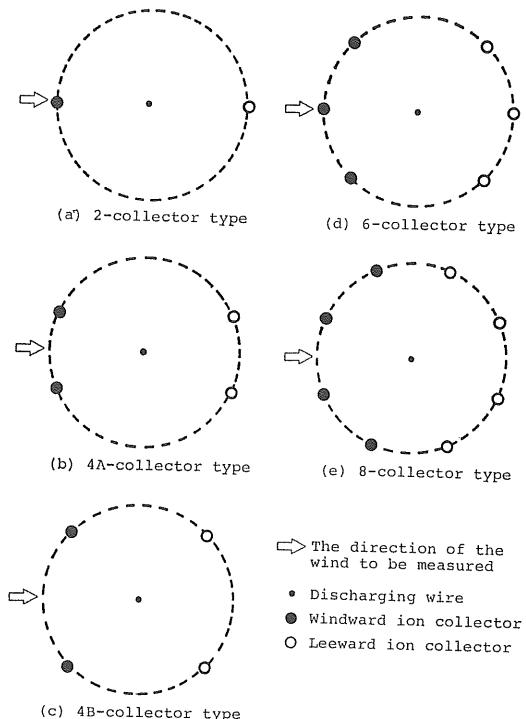


図3 コレクタ電極の配置

Fig. 3 The arrangement of ion collectors.

6141) を用いた。測定範囲は $0\sim1\text{ m/s}$ および $0\sim10\text{ m/s}$ で、測定精度はフルスケール値の $\pm 2\%$ である。熱線式風速計プローブの設置位置は、それがイオン風速計に極力影響を与えないように、イオン風速計の風上側 70 mm 、風洞中心軸から 40 mm 壁寄りの位置とした。熱線式風速計のアナログ出力端子からの出力を $X-Y$ 記録計の X 軸に入力し、 Y 軸へは必要とする特性に応じてイオン風速計の出力電圧を入力した。なお、長時間にわたる出力特性の変動を求めるときにはデータロガー（ADVANTEST TR2723）を用いた。

3. 結果および考察

3.1 プローブのコロナ放電特性

コロナ放電においてペーストパルスやストリーマパルスの発生は生成されるイオンの量に変動を起こさせる要因となるので、あらかじめコロナ電流波形を観測してパルスの発生の有無を確かめ、放電線への印加電圧を決めた。ここでは、図1に示した電流-電圧変換回路を用いないでコレクタ電極から直接 $10\text{ k}\Omega$ の抵抗を通して接地し、コロナ放電時の抵抗両端の電圧波形をオシロスコープで観測した。2電極配置では印加電圧が 13 kV 以下、4～8電極配置では 10 kV 以下であるならば、パ

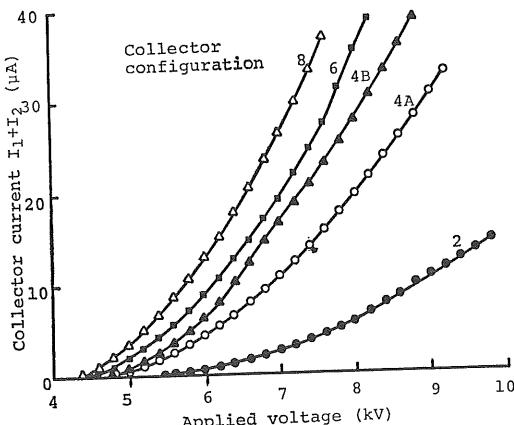


図4 無風時のコロナ放電電流

Fig. 4 Corona discharge current (wind velocity 0 m/s).

ルス性の電流は観測されなかった。

風速計プローブの5種類のコレクタ配置における放電線への印加電圧とコロナ電流の大きさとの関係を図4に示す。このときの電流の大きさは個々のコレクタに流れ込む電流の総和である。コレクタの数が多くなるほどコロナ開始電圧は低くなる。2電極配置では5.5 kV、8電極配置では4.3 kVで4および6電極配置ではそれらの間の値をとる。ただし、4Aおよび4B電極配置の開始電圧はほぼ同じ値を示した。

一定の印加電圧に対するコロナ電流の大きさはコレクタの数が増えるにつれて大きくなる。したがって、8電極配置では他の配置に比べて、放電線への印加電圧が低くてより多くのイオンを生成することができる。放電線への印加電圧をより低い値に保つことができれば、電極支持体の電気絶縁が容易でプローブの小型化も可能となる。

2種類の4電極配置のコロナ電流特性を比べると、コロナ開始電圧はほぼ等しいが、4本のコレクタが $\pi/2$ の角度ごとに置かれている4Bのほうが、4Aの場合に比べて大きな電流値が得られている。このことは、電流の大きさに寄与するのは放電線表面の電界の強さだけではなく、放電線とコレクタの間の電界の分布も大きく寄与していることを意味している。すなわち、放電線をコレクタが取り囲む配置になっている4B電極配置は、4A配置と比較して電気力線がコレクタにより多く向かっていることが十分推察できる。2電極配置では他のものと比較して電流値が小さい。

3.2 風速-出力特性

3種類のコレクタ電極配置において、放電線への印加

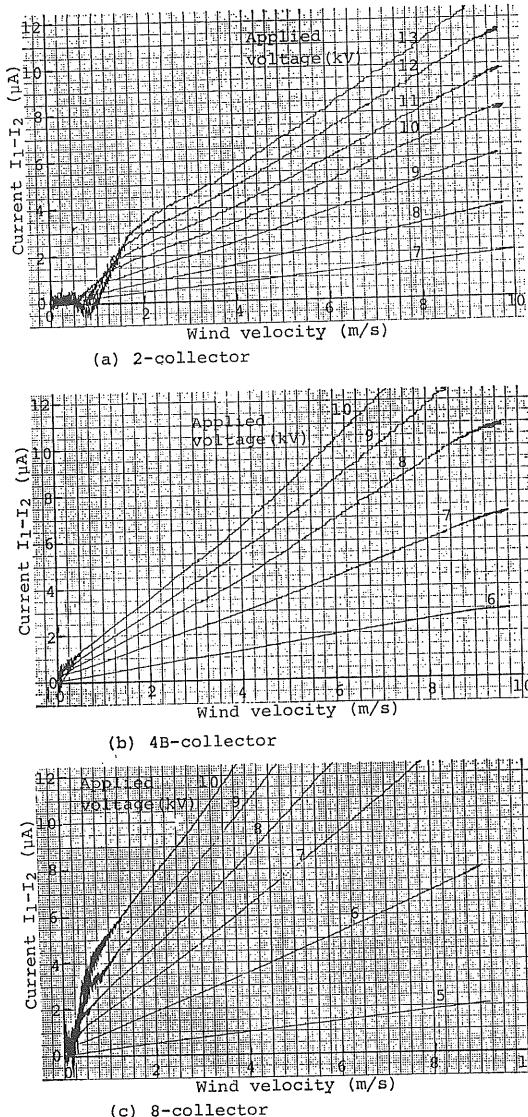


図5 イオン電流と風速との関係

Fig. 5 The relation between the collector current and the wind velocity.

電圧をパラメータとしたときの風速に対するイオン電流の変化 $I_1 - I_2$ を図5(a)～(c)に、イオン風速計の出力 V_0 を図6(a)～(c)に示す。両図は横軸を熱線式風速計の出力として、対応するイオン電流および出力をそれぞれ一枚のX-Y記録紙上に描かせたものである。

イオン電流の変化量は、低風速領域を除いて、風速が増大するにつれてほぼ直線的に増加する。また、印加電圧が低いほどより小さな風速領域まで直線性は良好であるが、直線の傾きは小さくなる。逆に、出力 V_0 は図6に示すように印加電圧が低くなるほど大きくなる。これ

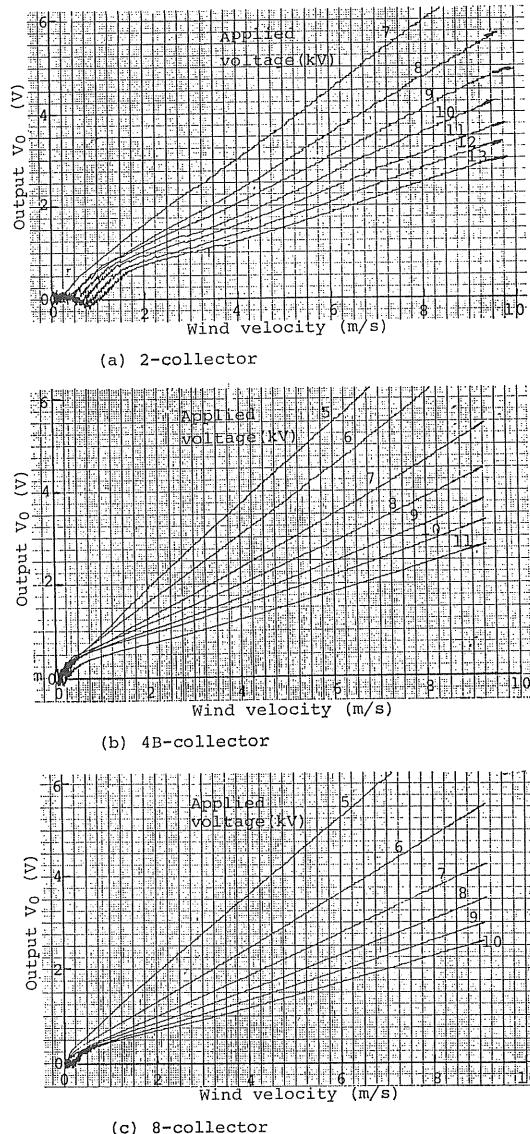


図6 風速計出力におよぼす印加電圧の影響

Fig. 6 Influence of the applied voltage on anemometer output.

は、出力が $(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ に比例する形で与えられ、このなかで分母の $I_1 + I_2$ は印加電圧の増大とともに増加することに起因している。

2電極配置では 1.6 m/s 以下の風速領域で出力特性が直線から大きくなり、放電線への印加電圧が高くなるにつれて特性のくずれがより高い風速領域に広がっている。これは図5(a)に示したコレクタに流れ込むイオン電流の差 $I_1 - I_2$ の変化からも明らかで、この風速領域では気流よりもイオン風が大きく、イオンの輸送には

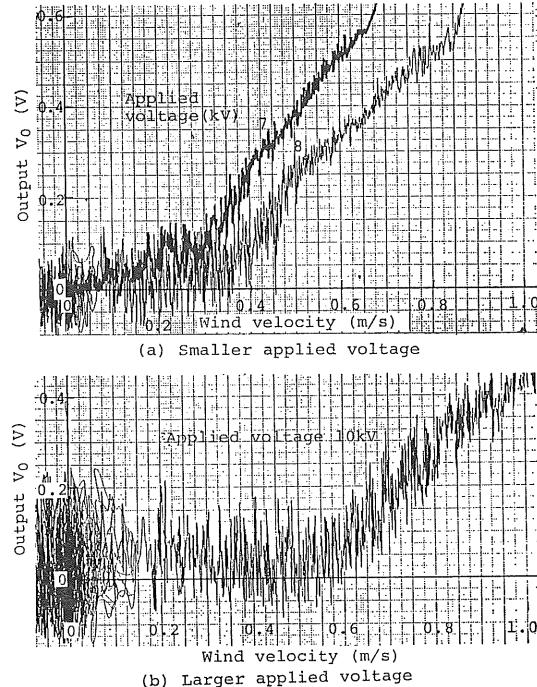


図7 1 m/s 以下の風速に対する2電極プローブの応答特性

Fig. 7 Output of the anemometer with the 2-collector probe under wind velocity of 1 m/s.

イオン風が支配的になるためである。とくに、2電極配置の場合、気流とイオン風の方向とが一致しているためイオン風の影響が大きく現われている。

4Bおよび8電極配置でもその出力に直線からのずれはみられるが、2電極配置の場合ほど、影響を受ける風速領域は大きくない。2電極配置以外では気流の方向以外のイオン風があるため、イオン風はそれほど出力に大きな影響を与えていない。

2および8電極配置について 1 m/s 以下の風速に対する出力特性をさらに詳細に示したものが図7および図8である。2電極配置の場合、放電線への印加電圧が低いときには出力は 0.3 m/s 付近からほぼ直線的に増加しているが、出力の変動が現われている。また、イオン風は熱線式風速計の出力にも影響を与えている。図7(b)の低風速において顕著にみられるように印加電圧が高くなると縦軸に対応する出力の変動のほかに、多くのランダムなループが描かれている。これは横軸に対応する量に大きな変動が生じているためである。

これに対して、8電極配置の場合では、イオン風の影響を受ける領域が風速の低い領域に限られており、おもに変動するのはイオン風速計の出力である。それでも、印加電圧が高くなるに従って、より高い風速領域まで出力の直線性が悪くなっている。したがって低風速測定の

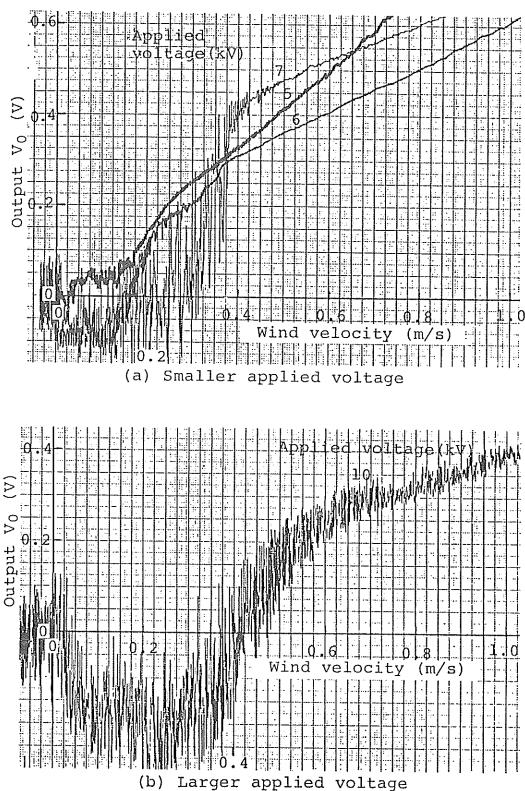


図8 1 m/s以下の風速に対する8電極プローブの応答特性

Fig. 8 Output of the anemometer with the 8-collector probe under wind velocity of 1 m/s.

場合には、イオン風の影響を避けるためにできるだけ低い電圧を使用することが望ましい。図8(b)に示すように電圧を5kVに設定すれば0.2m/s以上の風速を測定することが可能である。

3.3 感度指向性

風向の違いによる風速計の感度を明らかにしておくことは風速計としての適用性を考える上で重要である。また、二次元方向の風向風速を検知するための基礎データともなる。ここでは風洞内に風速プローブを設置し、一定方向からの風に対してプローブを回転させた場合の回転角度と風速計出力との関係を求めた。便宜上、角度の基準を風速計プローブの放電線を中心にして風上側と風下側を分ける面にとった。通常の測定において風上および風下に相当するプローブの角度はそれぞれ $\pi/2$ および $-\pi/2$ となる。ポテンショメータをイオン風速計のプローブ軸に取り付け回転角度に対して比例した出力電圧を得られるようにした。この状態で角度 π のときの風速計出力が零になるように調整した後、プローブを1回転してその間の角度信号と風速計出力との関係をX-Y記録計で記録した。

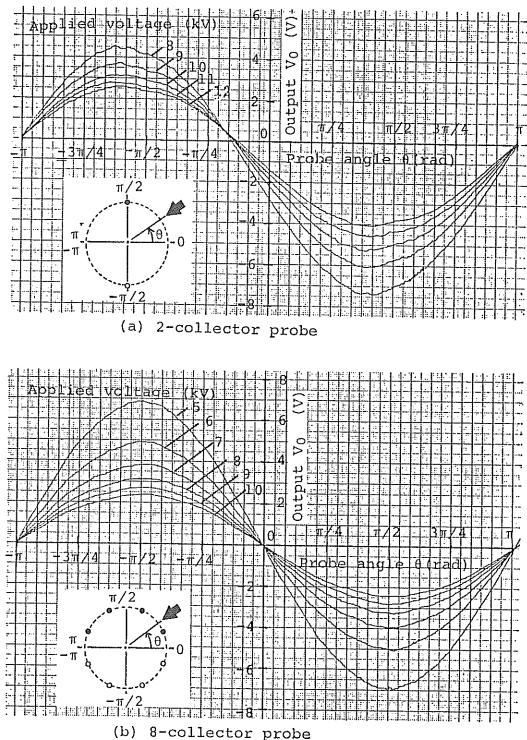


図9 風速8m/sにおけるプローブ角度と風速計出力との関係

Fig. 9 Relation between anemometer output and probe angle under wind velocity of 8 m/s.

2および8電極配置について風速が5m/s一定の状態で風速計出力のプローブ回転角度依存性を放電線への印加電圧をパラメータにして図9に示す。出力はプローブ角度すなわち風向の変化に対して正弦波状に変化する。印加電圧を一定にして風速を変化させた場合でも同様な特性が得られる。

8電極配置では、通常の測定における風上および風下に対応する方向からの風に対して、すなわちプローブ回転角 $\pi/2$ および $-\pi/2$ で出力電圧の極性は逆になるが、出力は最大値を示す。これに対して、2電極配置では最大感度を有するのが $\pi/2$ あるいは $-\pi/2$ ではなく、それから約 $\pi/12$ ずれたところにある。この理由は明らかではないが放電線やコレクタの表面状態、引出し線などによる電界分布さらには気流の乱れに關係しているものと推察される。

図10は図9の特性を感度曲線に書き直したもので、風向の角度に対する出力の絶対値をその出力特性の最大値で除することにより規格化したものである。出力が正確に正弦波状に変化したときの特性は図中の円で示される。

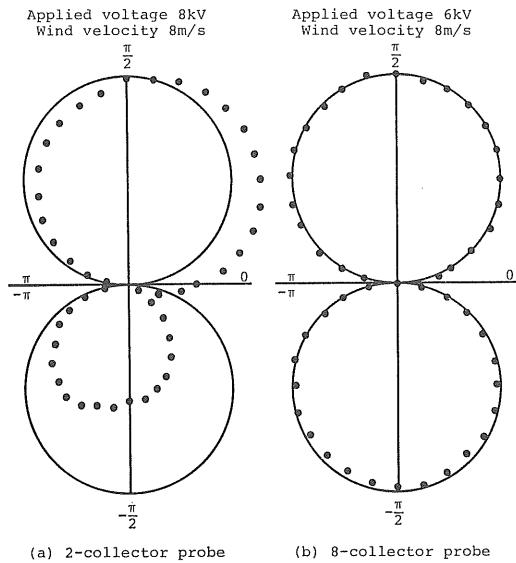


図 10 2 および 8 電極プローブの感度指向性

Fig. 10 Directivity of anemometer output with the 2 and 8-collector probes.

2電極配置プローブの指向性は円の特性から大きくずれるのに対して、8電極配置の指向性はほぼ円の特性すなわち、正弦波状変化に一致している。このことは本来の風速測定のプローブ位置、すなわち $\pi/2$ においてプローブが風向きに対して正確に向かっていなくても出力の誤差は少ないことを意味する。風向に対してプローブが $\pm\pi/12$ 偏向していても 4% 以内の精度で風速を測定できる。

3.4 安定性

出力の安定性は風速計を実際に用いる場合に、とくに望まれる特性である。コロナ放電が安定に持続し、一定量のイオンを供給しつづけること、プローブ自体が気流を乱さないことなどの条件は安定した出力を得るために重要であり、再現性を保つことができるよう条件をみつけることが必要である。しかしながら、コロナ放電の状態は気温、気圧、湿度などの気象条件により変化するので、コロナ電流の大きさを一定に保つことは一般に困難である。そのため、差動型イオン風速計では測定時のコロナ電流の大きさすなわち、 $I_1 + I_2$ でコロナ電流の変化量 $I_1 - I_2$ を規準化している。それでも放電線やコレクタの経時変化あるいは電子回路のドリフトなどにより出力は変動するので、この変動による風速測定の精度を短時間の変動および長時間のドリフトの測定から評価した。

3.4.1 短時間特性

放電線の印加電圧を一定に保った状態で、風洞ファンの電圧を増加させることにより風速を 0 m/s から 9 m/s

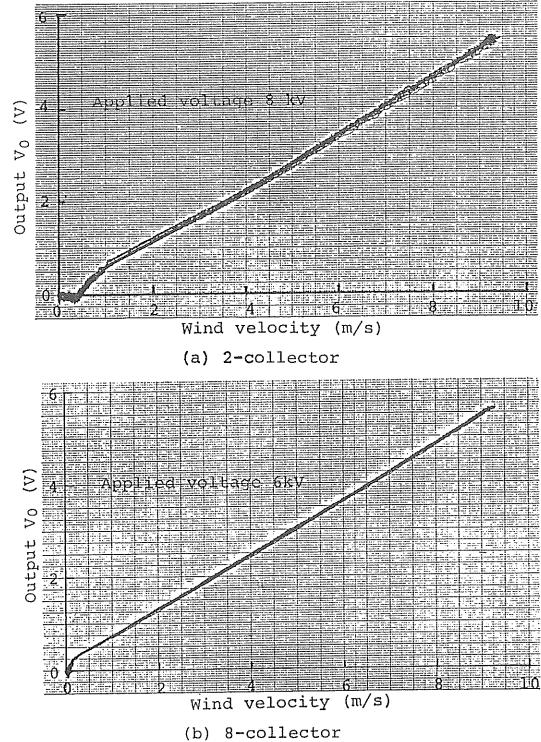


図 11 風速計出力の再現性

Fig. 11 Reproducibility of the anemometer.

まで変化させ、その後、逆に 0 m/s まで減少させる。これを 10 回繰り返して出力の再現性を確かめた。出力はこれまでと同様に、熱線式風速計により測定された風速との対応を示している。用いた熱線式風速計の応答速度は 1 秒であるので、風速の増減に対して追隨できるように風洞ファン電圧の 1 回の上昇および下降にはそれぞれ約 60 秒をかけた。結果として得られる出力特性は約 1,200 秒間の変動幅を示すことになる。

5種類の電極配置のうち、2 および 8 電極のプローブによる測定例を図 11 に示す。変動幅はコレクタ構成が一定ならば印加電圧にはほとんど依存せず、イオン風の影響を受ける領域を除いて、全風速領域についてほぼ一定になる。また、コレクタの数が増えるに従って変動幅は小さくなる傾向を示す。風速を増大させるとときと減少させるとときとでとくにヒステリシス現象はみられない。

図 11 の特性をとる際に、X 軸に対応する風速値が変動することもあるが、これは風速測定の標準にしている熱線式風速計の出力の変動である。したがって、図 11 の特性は両者の変動を含んだものであり、厳密な意味ではイオン風速計自体の出力変動幅はこれよりも小さいものとなろう。

図 11 に示す特性から風速測定の精度を見積もる。こ

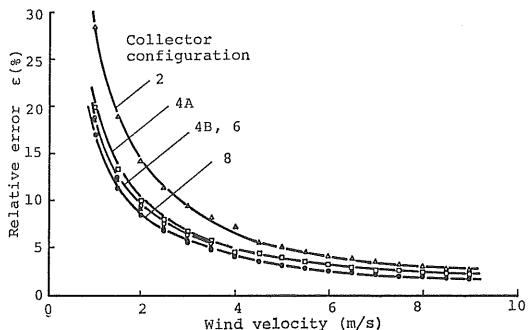


図 12 風速測定における相対誤差 (印加電圧 8 kV)

Fig. 12 Relative error in the measurement of wind velocity (applied voltage of 8 kV).

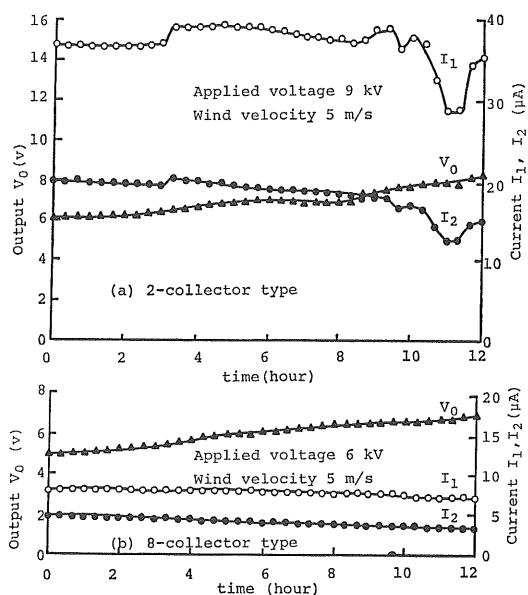


図 13 長時間連続作動に対する風速計出力

Fig. 13 Long period deviation of anemometer output for continuous operation.

こでは、熱線式風速計の出力変動はイオン風速計の変動に比べて無視できるほど小さなものと仮定する。出力の変動幅は放電線への印加電圧にはほとんど依存しないので、測定精度は出力特性の曲線の傾きだけに依存する。すなわち、風速測定に対する相対誤差 ϵ は、風速 W のときの出力変動幅を ΔV とし、曲線の傾きを R とすれば $\epsilon = \Delta V / RW$ で表わされ、印加電圧が低いほど傾き R は大きくなるので、測定精度はよくなる。

放電線への印加電圧を 8 kV にしたときの 5 種類の電極配置に対する各風速値に対する相対誤差を図 12 に示す。電極数が増えるに従って誤差は小さくなり精度はよくなっている。8 電極配置の場合、風速 9 m/s における

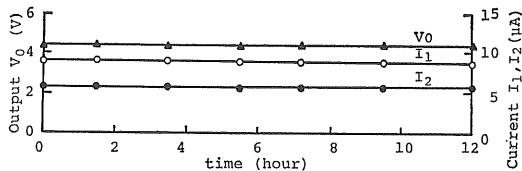


図 14 長時間間欠作動に対する 8 電極プローブの風速計出力

Fig. 14 Long period output of the anemometer with the 8-collector probe for intermittent operation.

測定精度は 2 %未満である。

3.4.2 長時間特性

風速計プローブを風洞に設置し、5 m/s の気流中で 12 時間連続的に作動させたときの風速計出力および風上と風下側のコレクタに流れ込む電流を測定した。測定に際しては、データロガーを使用し、20 分ごとにそれぞれの値を読みとった。図 13 に 2 および 8 電極配置プローブを用いた出力特性を示す。両電極配置ともに風速計出力は時間の経過に従って徐々に増加する傾向を示す。図 (a) の 2 電極配置プローブの特性において、コレクタに流れ込む電流の大きさは大きく変動しているが、出力にはその変動は現われず差動方式の有効性を示している。図 (b) の 8 電極配置プローブではコレクタ電流の変化は小さいにもかかわらず出力だけが増加している。したがって、これはコロナ放電の安定性よりもむしろ割算器など信号処理回路の安定性に起因すると考えられる。

そこで、風速計を連続的に作動させるのではなく、間欠的に作動させて出力の変動を確かめた。全測定時間 12 時間のうち 1.5~2 時間ごとに高電圧電源および電流測定回路の電源を投入し、10 分間の暖機運転の後出力特性をとったものが図 14 である。コレクタ電流および出力はその値がほとんど変化しておらず、非常によい再現性が得られている。この結果から、断続的な使用目的に対しては現在の測定システムで十分適用可能であることが明らかであり、また、連続作動状態でも信号処理回路の安定性を高めることにより、安定した出力を得ることが期待できる。

4. まとめ

放電線対多電極コレクタ系のコロナ放電を利用する差動型イオン風速計の実用性を検討するため、風速測定性能におよぼすコレクタ数の影響を実験的に明らかにした。得られたおもな結果は以下のとおりである。

- (1) 風速プローブを構成するコレクタ数が多いほどコロナ開始電圧が低くなる。また、イオン電流の変動は少なく、コロナ放電の状態は安定する傾向にある。

(2) 風速に対するイオン風速計の出力は放電線への印加電圧が低いほど低風速領域まで直線性がよい。コレクタ数および放電線印加電圧に依存するが、1~2 m/s 以下の領域でイオン風による影響が現われる。イオン風の影響を避けるには放電線への印加電圧をできるだけ低くする必要がある。

(3) 8電極配置の風速プローブでは測定感度の指向性はほぼ正弦波状に変化する。風速プローブが風向に対して $\pm\pi/12$ 偏向していても 4% の誤差で風速測定が可能である。

(4) 風速計としての測定精度および安定性の点から、実験した範囲では 8電極配置のプローブ形状が優れており、1~9 m/s の風速を $\pm 1\%$ の精度で測定可能である。

本論文では差動型イオン風速計の実用化の可能性を明らかにしたが、放電線とコレクタ電極間の電位分布および電界の強さ、気流によるイオンの流れ、イオン風の効果など基礎的な問題は多く残されており、今後さらに詳細な検討を行なう予定である。また、風洞の性能の制約

から 10 m/s までの風速に対してだけ検討を行なったが、イオン風速計の風速に対する出力特性からさらに高い風速領域まで適用の可能性があり、今後の検討課題である。

本研究を遂行するに当たり風速計プローブの製作に対して助言をいただいた本学の鈴木春男技官に謝意を表します。

参考文献

- 1) ジャン・バラ：公開特許公報(A), 昭56-93049
- 2) J.E. Lovelock and E.M. Wasilewska : J. Sci. Instrum., 26 (1949) 367
- 3) C.G. Clayton and J.W. Webb : Int. J. Appl. Radiat. Isot., 18 (1964) 603
- 4) K. Janka : Rev. Sci. Instrum., 55 (1984) 976
- 5) 東山禎夫, 榎本茂正 : Radioisotopes, 36 (1987) 325
- 6) W.C. Cooley and H.G. Stever : Rev. Sci. Instrum., 23 (1952) 151
- 7) 関山正憲, 原田幸夫 : 電気工学論文集, 4 (1952) 39
- 8) 浅野和俊, 布川利光 : 静電気学会誌, 10 (1986) 123